基于LMDI-SD耦合模型的关中地区水资源承载力动态预测与调控

贾 琼[1]， 宋孝玉[1]， 宋淑红[2]， 刘晓迪[1]， 覃 琳[1]， 刘 辉[1]

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室，陕西 西安 710048；
2. 陕西省水文水资源勘测中心，陕西 西安 710068)

摘　要： 为实现区域水资源承载力的动态预测与定量调控，构建LMDI-SD耦合模型。模型采用对数平均迪式指数(LMDI)分解法，识别用水量变化关键驱动因子；构建系统动力学(SD)模型，预测水资源承载力；以用水量变化关键驱动因子为调控指标，对经济社会用水进行全面调控；结合正交试验法，筛选最优调控方案。应用于2022—2035年关中地区水资源承载力的动态预测与调控，结果表明：(1) 强度效应是关中地区农业用水量减少、生活和生态用水量增加的关键驱动因子，规模效应是工业用水量增加的关键驱动因子；(2) 现状发展模式下，由于用水总量增加幅度(37.13%)远大于可供水量增加幅度(12.25%)，关中地区水资源承载压力逐年变大，从2026年开始将处于超载状态；(3) 引汉济渭工程能从“供给侧”有效缓解关中地区水资源供需矛盾，但相对于快速增长的需求，部分城市水资源仍供不应求，还需从“需求侧”加以调控；(4) 最优调控方案下，关中地区水资源可调控至临界承载状态，且相较于生活、生态及农业用水水平，工业发展规模调控范围更大，应重点优先调控。模型对可持续发展框架下，区域水资源规划与管理具有较好的实际应用价值。

关键词： 水资源承载力；动态预测；定量调控；系统动力学；关中地区

近年来，受气候变化和人类活动综合影响，我国水资源面临着资源约束趋紧、环境污染严重及生态系统退化的严峻形势[1]。为此，我国将生态文明建设纳入国家安全领域，全面推进以承载力评价为基本组成部分的“双评价”工作的开展，引导和约束各地严格按照水资源承载力谋划经济社会可持续发展[2]。关中地区地处西北，气候干旱，水资源匮乏。作为陕西省人口和经济集聚区，水资源需求量大，资源有限性和需求无限性矛盾日益凸显，加之存在开发利用强度高及污染严重等问题[3]，需更关注重水资源因地制宜高效利用和合理开发保护，开展关中地区水资源承载力研究显得尤为重要。

水资源承载力是衡量地区发展与资源协调程度的重要指标，自20世纪80年代提出以来，研究成果丰硕[4]。早期水资源承载力研究侧重于概念界定、评价方法探索及综合评价[5-7]，随着水资源规划管理实践深入，仅开展静态评价已难以满足现代化治水需求，动态预测调控成为新的研究热点[8]。水资源承载力预测方法包括系统动力学法[9-10]、回归分析法[11]、人工神经网络法[12]等。系统动力学法凭借其强大的动态反馈机制，能够充分反映水资源承载系统的非线性、复杂时变性及多重反馈性等特征，在水资源规划管理领域得到广泛应用[13-15]。已有研究中，调控方案的设定方法可分为两种：一是基于模型参数敏感性分析，根据正交试验法制定；二是立足地区发展规划，由专家主观设定。但目前在设定调控方案时，对地区用水量变化驱动因子考虑不足，缺乏驱动机理支撑，根据驱动因子设定调控方案的研究相对较少[16]。

为构建水资源承载力动态预测与定量调控一体化模型，本文采用对数平均迪式指数(LMDI)分解法，识别用水量变化驱动因子；采用系统动力学法，

收稿日期： 2023-09-21； **修订日期：** 2023-10-20
基金项目： 国家重点研发计划项目(2016YFC0400301)
作者简介： 贾琼(1997-)，女，硕士研究生，研究方向为水文学及水资源. E-mail: Jiaqiong971002@163.com
通讯作者： 宋孝玉. E-mail: songxy@xaut.edu.cn

建立系统动力学(SD)模型,预测水资源承载力;以各部门用水量变化关键驱动因子为调控指标,对经济社会用水进行全面调控;并结合正交试验法,筛选最优调控方案。应用于关中地区2022—2035年水资源承载力动态预测与调控,模型具有实际应用价值,能为可持续发展框架下水资源规划管理提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

关中地区位于陕西省中部,北接黄土高原,南倚秦岭山脉,西起宝鸡,东至渭南,面积约$5.6×10^4$ km²,共包括5个城市(图1)。区域属暖温带半湿润半干旱气候,多年平均降雨量525.7 mm,地处黄河流域下游,渭河从中穿过,地表水因含沙量高利用困难,地下水是其主要供水水源[17]。2019年关中地区GDP总量为$1.59×10^{12}$元,常住人口为$2.44×10^7$人,水资源量为$81.49×10^8$ m³,仅占全省17%的水资源量承担着61%的人口和63%的经济总量。可见,作为陕西省的经济中心和人口聚集区,水资源却相对匮乏,且时空分布不均,人均水资源量仅为334 m³,不足全国平均水平的1/3[18]。在人口和产业快速集聚

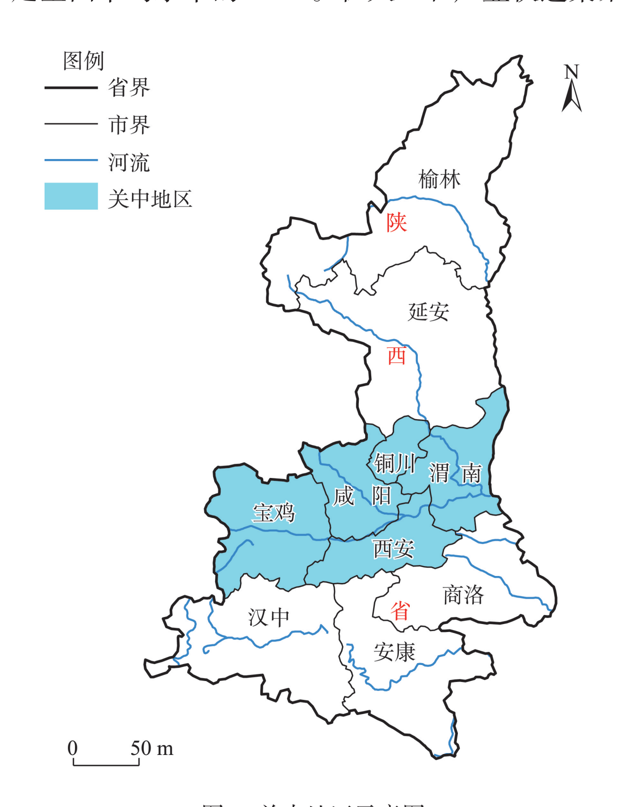


图1　关中地区示意图

Fig. 1　Sketch of Guanzhong region

式发展背景下,渭河部分河段水体污染、地下水超采及水土流失等问题日趋严重,水资源承载形势较为严峻[19]。

1.2 数据来源

经济、人口数据来源于陕西省《统计年鉴》(2010—2021年)、各城市《国民经济与社会发展统计公报》(2010—2021年);水资源数据来源于陕西省《水资源公报》(2010—2021年);环保数据来源于《全国第二次污染源普查生活源产排污系数手册》;模型预测年份参数设置参考陕西省及各城市《国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》《陕西省"十四五"水利发展规划》等。

2 水资源承载力预测与调控模型构建

为开展水资源承载力动态预测与定量调控一体化研究,综合运用LMDI分解法、系统动力学法和正交试验法,构建LMDI-SD耦合模型。

2.1 基于LMDI分解法的用水量驱动因子识别

2.1.1　用水量分解　Kaya[20]恒等式通过数学恒等变换,将研究对象分解为若干驱动因子的乘积。设W为用水总量,用水总量由农业、工业、生活和生态用水量组成;W_i为用水部门i的用水量,$i=1,2,3,4$分别表示农业、工业、生活和生态四大用水部门,将用水部门i的用水量变化驱动因子划分为Q_i、S_i和D_i三类,分别表示驱动该部门用水量变化的强度效应、结构效应和规模效应,则基于Kaya[20]恒等式的用水总量因素分解模型可表示为:

$$W=\sum_{i=1}^{4}W_i=\sum_{i=1}^{4}Q_iS_iD_i \tag{1}$$

考虑到用水量影响因素差异,不同用水部门驱动效应采用不同因子表征,在式(1)基础上,对各部门用水量分别进行分解。

其中,农业用水量W_1可分解为:

$$\begin{aligned}W_1&=\sum_{j=1}^{2}W_{1,j}=\frac{W_{1,1}}{A}\cdot\frac{A}{F}\cdot F+\frac{W_{1,2}}{G_f}\cdot\frac{G_f}{G}\cdot G\\&=\sum_{j=1}^{2}Q_{1,j}S_{1,j}D_{1,j}=Q_1S_1D_1\end{aligned} \tag{2}$$

式中:$W_{1,1}$为农田灌溉用水量(10^8 m³);$W_{1,2}$为林牧渔业用水量(10^8 m³);A为灌溉面积(hm²);F为耕地面积(hm²);G_f为林牧渔业增加值(10^8元);G为

地区生产总值(10^8元);$Q_{1,1}=\frac{W_{1,1}}{A}$为单位面积灌溉用水量($m^3\cdot hm^{-2}$);$Q_{1,2}=\frac{W_{1,2}}{G_f}$为万元林牧渔业增加值用水量[$m^3\cdot(10^4$元$)^{-1}$];$S_{1,1}=\frac{A}{F}$为耕地灌溉率(%);$S_{1,2}=\frac{G_f}{G}$为林牧渔业增加值在生产总值中所占比例(%);$D_{1,1}=F$为耕地面积($hm^2$);$D_{1,2}=G$为地区生产总值($10^8$元);$Q_1=\sum_{j=1}^{2}Q_{1,j}$、$S_1=\sum_{j=1}^{2}S_{1,j}$、$D_1=\sum_{j=1}^{2}D_{1,j}$分别表示驱动农业用水量变化的强度效应、结构效应和规模效应。

工业用水量W_2可分解为:

$$W_2=\frac{W_2}{G_I}\cdot\frac{G_I}{G}\cdot G=Q_2S_2D_2 \tag{3}$$

式中:G_I为工业增加值(10^8元);G为地区生产总值(10^8元);$Q_2=\frac{W_2}{G_I}$为万元工业增加值用水量[$m^3\cdot(10^4$元$)^{-1}$],表示驱动工业用水量变化的强度效应;$S_2=\frac{G_I}{G}$为工业增加值在生产总值中所占比例(%),反映地区发展结构对工业用水量变化的驱动效应;$D_2=G$为地区生产总值(10^8元),表示驱动工业用水量变化的规模效应。

生活用水量W_3可分解为:

$$W_3=\sum_{j=1}^{2}W_{3,j}=\sum_{j=1}^{2}\frac{W_{3,j}}{P_j}\cdot\frac{P_j}{P}\cdot P=\sum_{j=1}^{2}Q_{3,j}S_{3,j}D_{3,j}=Q_3S_3D_3 \tag{4}$$

式中:$W_{3,j}(j=1,2)$分别为城镇、农村生活用水量($10^8\ m^3$);$P_j(j=1,2)$分别为城镇、农村人口数(10^4人);P为人口总数(10^4人);$Q_{3,j}=\frac{W_{3,j}}{P_j}(j=1,2)$分别为人均城镇、农村生活用水量($m^3\cdot$人$^{-1}$);$S_{3,j}=\frac{P_j}{P}(j=1,2)$分别为城镇、农村人口在总人口中占比(%);$D_{3,j}=P(j=1,2)$为人口总数($10^4$人);$Q_3=\sum_{j=1}^{2}Q_{3,j}$、$S_3=\sum_{j=1}^{2}S_{3,j}$和$D_3=\sum_{j=1}^{2}D_{3,j}$分别表示驱动生活用水量变化的强度效应、结构效应和规模效应。

生态用水量W_4可分解为:

$$W_4=\frac{W_4}{W}\cdot\frac{W}{P}\cdot P=Q_4S_4D_4 \tag{5}$$

式中:$Q_4=\frac{W}{P}$为人均用水量($m^3\cdot$人$^{-1}$),表示驱动生态用水量变化的强度效应;$S_4=\frac{W_4}{W}$为生态用水量在用水总量中所占比例(%),表示驱动生态用水量变化的结构效应;$D_4=P$为人口总数(10^4人),表示驱动生态用水量变化的规模效应。

2.1.2 LMDI分解方式 LMDI分解方式包括加法和乘法两种,二者分解结果具有一致性和唯一性,其中加法方式将研究对象变化量分解为若干因子的驱动效应之和,过程更加直观、简洁[21]。因此,采用LMDI加法分解方式,将各部门用水量变化量ΔW_i分解如下:

$$\Delta W_i=W_i^t-W_i^0=\Delta S_i+\Delta Q_i+\Delta D_i \tag{6}$$

式中:W_i^0、W_i^t分别表示第i个部门时段初、末的用水量($10^8\ m^3$);ΔQ_i、ΔS_i、ΔD_i分别表示强度效应、结构效应、规模效应对用水量变化的贡献度($10^8\ m^3$),贡献度绝对值越大,表示促进或抑制作用越显著,计算公式为:

$$\Delta Q_i=\frac{W_i^t-W_i^0}{\ln\left(W_i^t\right)-\ln\left(W_i^0\right)}\ln\left(\frac{Q_i^t}{Q_i^0}\right) \tag{7}$$

$$\Delta S_i=\frac{W_i^t-W_i^0}{\ln\left(W_i^t\right)-\ln\left(W_i^0\right)}\ln\left(\frac{S_i^t}{S_i^0}\right) \tag{8}$$

$$\Delta D_i=\frac{W_i^t-W_i^0}{\ln\left(W_i^t\right)-\ln\left(W_i^0\right)}\ln\left(\frac{D_i^t}{D_i^0}\right) \tag{9}$$

式中:Q_i^0、S_i^0、D_i^0与Q_i^t、S_i^t、D_i^t分别为三类驱动因子时段初值与时段末值($10^8\ m^3$)。

2.2 水资源承载力SD模型

2.2.1 模型构建 系统动力学通过分析系统构成要素及其内部动态反馈机制,研究系统的行为和功能。本文在对水资源承载力进行系统分析基础上[16],从供给与消耗角度出发,将水资源承载系统划分为水资源、生活用水、生产用水和生态用水4个子系统,子系统间以水资源为纽带,相互联系并制约,共同影响关中地区水资源承载状况。

(1) 水资源子系统

水资源子系统包括可供水量和用水总量两部分。可供水量反映水资源对经济社会发展的支撑能力,包括地表水及地下水可供水量、再生水可利用量及外调水量;用水总量反映经济社会发展对水资源产生的压力,为生产、生活及生态用水量之和。最终由水资源承载指数(WRCI)评价水资源承

载状态,WRCI为用水总量与可供水量之比,评价标准为:WRCI<0.9为可承载;0.9<WRCI<1为临界;WRCI>1为超载[22]。

(2)生活用水子系统

生活用水量由城镇、农村居民生活用水量构成,采用定额法计算。人口数量是生活用水子系统的核心变量,由出生率、死亡率和机械增长率共同决定,引入城镇化率将总人口划分为城镇及农村人口,反映人口结构变化对生活用水量的影响。

(3)生产用水子系统

生产用水子系统反映经济社会生产活动用水给水资源承载系统带来的压力,包括农业和工业2个用水模块,其中,农业用水由农田灌溉用水和林牧渔用水组成。农田灌溉用水量采用灌溉定额法计算,且受灌溉水有效利用系数影响;林牧渔业和工业的产值规模是反映用水需求和发展水平的重要指标,由万元产值用水定额计算其用水量。

(4)生态用水子系统

生态用水包括河道内生态用水和河道外生态用水。河道内生态用水量取多年平均径流量的15%,在确定地表水可供水量时一次性扣除。河道外生态用水量指为保证城市生态系统良性循环和发展目标所用水量,包括绿地用水、河湖景观用水及环境卫生用水等[23],与城市发展规模密切相关,采用人均定额法计算。

各子系统中,系统基本要素被简化为适当变量。将随时间变化不敏感的变量设定为常量,如产流系数、工业及生活污水排放系数等;工业增加值、林牧渔增加值、人口总数和耕地面积等具有累积效应的变量,设定为状态变量,由速度变量反映其变化快慢;辅助变量为变量间的过渡变量;随时间变化且与时间呈非线性关系的变量采用表函数描述。

Vensim软件是应用最广泛的系统动力学建模软件,共有Vensim PLE、Vensim Professional和Vensim DSS三种版本。本文借助Vensim.PLE x 32软件,建立起包含3个常量、4个状态变量、6个速度变量、24个辅助变量和21个表函数的水资源承载力SD模型,系统反馈关系如图2所示。

2.2.2　模型设置　市域SD模型以各市行政区划为空间边界,时间边界为2010—2035年,其中,2010—2021年为验证期,2022—2035年为预测期。预测步长为1 a,预测基准年为2022年,根据2010年统计数据,设置状态变量初始值,如表1所示。

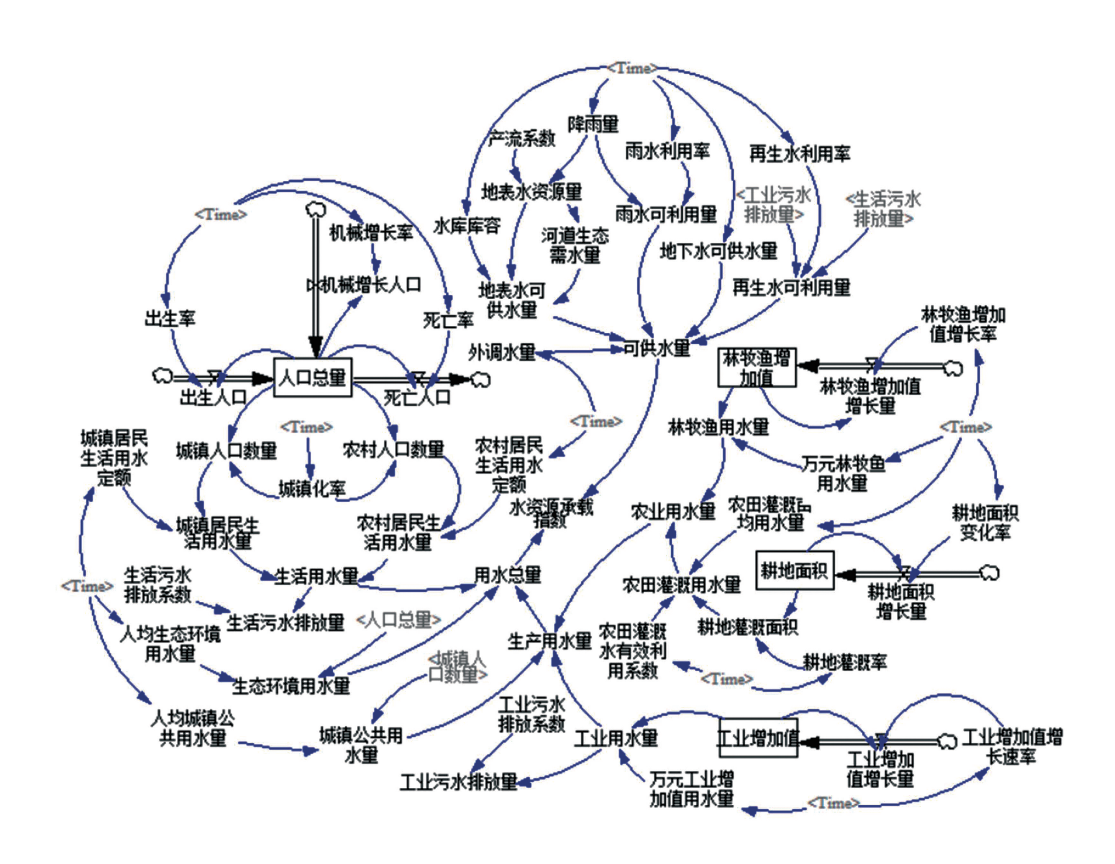


图2　水资源承载力SD模型流图

Fig. 2　SD model flow chart of water resources carrying capacity

表1 市域SD模型状态变量初始值

Tab. 1 Initial values of city SD model state variables

状态变量	初始值				
	西安	铜川	宝鸡	咸阳	渭南
人口总数/10^4人	1020.35	78.01	376.10	435.62	527.81
耕地面积/$10^4 hm^2$	24.09	7.16	29.17	39.16	48.10
工业增加值/10^8元	1868.86	167.55	1127.74	845.12	694.56
林牧渔增加值/10^8元	82.98	11.32	120.81	120.81	148.48

2.2.3 参数估计 需要估计的参数包括常量取值和决策变量预测年份值,其中,决策变量为21个变量-时间表函数。基于2010—2021年各城市人口、经济、水资源统计数据,综合运用数理统计法和趋势分析法估计参数,并结合发展规划进行调整。

(1) 常量取值。产流系数取2010—2021年历史统计数据的算术平均值;工业污水排放系数和城镇生活污水排放系数参考《第一次全国污染源普查城镇生活源产排污系数手册》和《全国第二次污染源普查生活源产排污系数手册》取值,如表2所示。

(2) 决策变量预测年份值。出生率、死亡率、机械增长率、耕地灌溉率、耕地面积变化率、林牧渔畜增加值增加率和工业增加值增长率等7个速度变量,预测年份取2010—2021年统计数据的算术平均值,体现社会机构变化与经济发展的平均水平。城镇化率根据各城市《十四五规划》取值。水库库容根据《陕西省"十四五"水利发展规划》取值。单位面积农田灌溉用水量、居民日生活用水量和万元工业增加值用水量等9个体现用水水平的变量,采用年均变化量法进行趋势预测,并参考《十四五规划》发展目标进行调整。外调水为引汉济渭工程所调汉江水,根据《陕西省引汉济渭工程项目建议书受水区水资源配置规划》配水总体方案取值。

表2 市域SD模型常量取值

Tab. 2 Constant values of city SD model

常量	取值				
	西安	铜川	宝鸡	咸阳	渭南
产流系数	0.24	0.09	0.23	0.06	0.09
城镇污水排放系数			0.8		
工业污水排放系数			0.5		

2.2.4 模型检验 模型检验的目的在于判断模型是否能够准确反映系统的行为和变化规律[24],本文从合理性和有效性两方面进行模型检验。运行Vensim.PLE X 32软件中"Check Model"和"Unit Check"两个功能模块,分别检验模型结构和量纲的合理性,运行结果均为"Model is OK",说明模型具有合理性。选取人口、工业增加值和用水总量3个较具代表性的变量检验模型有效性,所选变量验证期模拟值与真实值之间的相对误差均小于10%,如表3所

表3 关中地区水资源承载力SD模型有效性检验

Tab. 3 Validity test of SD model of water resources carrying capacity in Guanzhong region

年份	人口总量			工业增加值			用水总量		
	S/10^4人	H/10^4人	E/%	S/10^8元	H/10^8元	E/%	S/$10^8 m^3$	H/$10^8 m^3$	E/%
2010	2322	2322	0.00	2428	2428	0.00	48.87	48.75	0.26
2011	2330	2330	0.00	3067	3065	0.08	50.85	50.32	1.06
2012	2338	2338	0.01	3673	3659	0.37	51.92	51.33	1.14
2013	2345	2345	0.01	4034	4097	1.53	52.11	51.79	0.60
2014	2352	2353	0.02	4134	4181	1.13	52.50	52.88	0.71
2015	2364	2365	0.02	4207	4267	1.42	53.52	53.81	0.53
2016	2380	2381	0.04	4268	4243	0.58	52.28	53.18	1.68
2017	2400	2399	0.04	4699	4670	0.63	54.10	54.47	0.68
2018	2430	2427	0.13	4820	4846	0.52	52.99	52.99	0.00
2019	2467	2438	1.18	4769	4704	1.39	51.56	51.50	0.12
2020	2560	2610	1.92	4342	4326	0.37	46.70	47.20	1.06
2021	2570	2640	2.65	5144	5230	1.64	48.16	48.53	0.76

注:H为历史实际值,S为模拟值,E为相对误差。

示,说明模型模拟效果较好[25],具有有效性,可用于关中地区水资源承载能力的模拟预测。

2.3 水资源承载力优化调控

正交试验设计是一种研究多因素多水平的试验设计方法,它根据正交性从全面试验中挑选出部分具有代表性的样本组合进行试验,具有高效、快速经济的特点[26]。采用正交试验法进行水资源承载力调控的步骤为:(1) 明确调控目标;(2) 选取调控指标:根据LMDI用水量分解结果,选取各部门用水变化关键驱动因素为调控指标;(3) 设定调控依据;(4) 制定调控方案:根据调控指标现状值及调控依据,确定指标水平数,再结合指标个数,选取合适的正交表,制定调控方案;(5) 采用SD模型模拟各方案调控结果,将不同调控方案水资源承载指数与调控目标作比较,选取差值绝对值最小的方案为最优调控方案。

3 关中地区水资源承载力预测与调控

3.1 用水量变化驱动因子

3.1.1 用水情况分析　根据陕西省水资源公报,统计2010—2021年关中地区各部门用水量并绘制变化趋势图(图3),从总量和结构两方面分析关中地区的用水情况。

由图3可知,2010—2021年关中地区用水总量呈倒“U”型波动变化,由2010年的48.75×10^8 m^3,先增加至2016年的53.18×10^8 m^3,再减少至2021年的46.71×10^8 m^3,累积减少2.11×10^8 m^3。2010—2016年关中地区用水总量的增加,一方面是发展规模扩大、人口数量增加的必然结果,另一方面也体现了随着关中地区“四横十纵”水系网络及水资源配套挖潜工程的逐步建设,区域水资源供给能力不断得到提升。而2016年后,在《全国水资源承载力监测预警机制技术大纲》出台、最严格水资源管理制度逐步落实背景下,用水总量得到控制,逐年波动下降,推动水资源利用效率提升。

将关中地区用水划分为农业、工业、生活及生态用水4类,分析用水结构变化。2010—2021年关中地区对用水比例进行了大规模的调整,农业、工业、生活、生态用水比例由2010年的63.4%、16.4%、18.6%、1.7%,调整为2021年的55.35%、9.83%、25.82%、8.99%。作为关中地区最大的用水部门,农业用水量呈波动下降趋势,累积下降达5.03×10^8 m^3,用水比例也被逐年压缩;工业用水量呈下降趋势,变化幅度最大,年均减少0.31×10^8 m^3,用水比例也显著下降;而生活、生态用水量则呈不同程度的上升趋势,其中,生态用水量增加最明显,由0.82×10^8 m^3增加到4.2×10^8 m^3,增幅高达411%,用水比例也由2010年的1.7%上升到2021年的8.99%。

3.1.2 用水水源变化分析　根据陕西省水资源公报,统计2010—2021年关中地区不同用水水源用水量,绘制变化趋势图(图4)。

由图4可知,关中地区用水水源包括地表水、地下水、外调水及非常规水4类。地表水由蓄水、引水及提水工程供给;地下水由机井水泵供给;非常规水为污水处理回用、雨水利用及矿坑水再利用。2010—2021年关中地区用水水源结构发生显著变化,地表水、地下水、外调水及非常规水源用水量占比由2010年的59.2%、40.1%、0.1%、0.6%,变化为2021年的62.1%、31.8%、0.83%、5.1%。

作为主要用水水源,地表水源用水量变化较

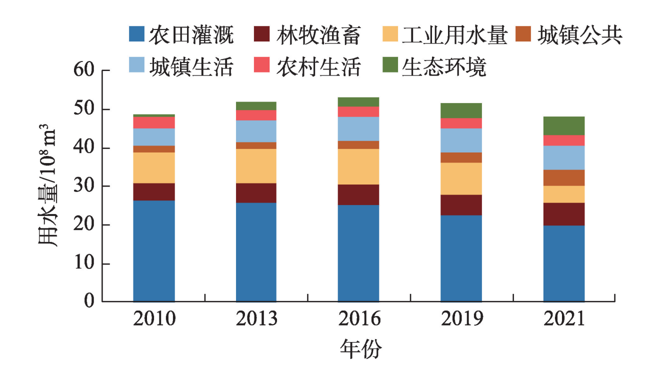


图3　关中地区各城市不同年份用水部门用水量

Fig. 3　Water consumption by water sector in different years in cities of Guanzhong region

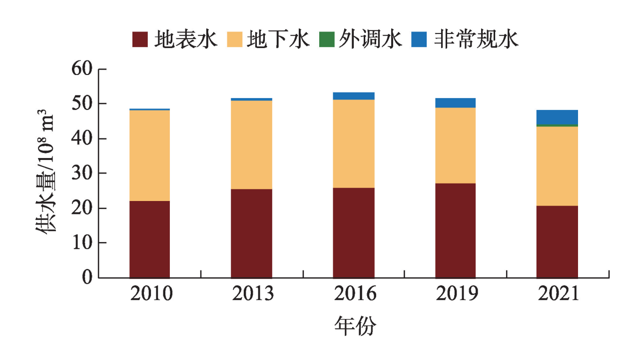


图4　2010—2021年关中地区用水水源及用水量

Fig. 4　Water source and consumption in Guanzhong region from 2010 to 2021

小，平均用水量30.85×10⁸ m³，用水量占比也相对稳定，在59.2%~62.1%范围内波动；地下水源用水量逐年减少，由19.5×10⁸ m³减小至14.8×10⁸ m³，年均减少0.41×10⁸ m³，用水量占比逐年降低；外调水、非常规水源用水量逐年上升，用水量占比相应提高，其中，非常规水源用水量占比提高显著，累积提升4.33%，常规水源承载压力得到置换。

3.1.3 用水量变化驱动因子识别　采用LMDI因素分解模型式(1)~式(9)，识别关中地区农业、工业、生活及生态用水变化驱动因子，结果如表4所示。

由表4可知，用水总量分解累积效应为负值，表明用水总量呈下降趋势，分解结果与实际用水过程一致。其中，规模效应为正值，抑制用水总量减少；强度效应和结构效应均为负值，促进用水总量减少；规模效应绝对值最大，对用水总量变化贡献度最大。可见，规模效应是2010—2021年关中地区用水总量减少的关键驱动因子。

表4 2010—2021年关中地区用水量变化LMDI分解结果

Tab. 4 LMDI decomposition results of water consumption change in Guanzhong region from 2010-2021

用水部门	贡献度			
	强度效应ΔQ	结构效应ΔS	规模效应ΔD	累积效应
农业	−7.30	−3.99	6.26	−5.03
工业	−5.99	−4.26	6.85	−3.40
生活	1.19	0.75	1.06	3.00
生态	3.47	−0.30	0.21	3.38
用水总量	−8.63	−7.80	14.38	−2.05

从各部门来看，农业、生活及生态用水分解结果中，均为强度效应绝对值最大，说明强度效应对农业、生活及生态用水量变化贡献最大。农业用水强度效应为负值，说明强度效应是农业用水量减少的关键驱动因子，说明虽然农业生产规模扩大，促进用水量增加，但随着最严格水资源管理制度实施、农业水价调整及节水灌溉技术推广等，农业用水强度显著降低，用水量呈下降趋势；而生活、生态用水强度效应为正值，说明强度效应是生活、生态用水量增加的关键驱动因子，表明随着人民生活水平的提高及生态环保观念的增强，对水资源的需求不断增加。工业用水分解中，规模效应绝对值最大且为正值，表明规模效应是工业用水量增加的关键驱动因子。

3.2 现状发展模式下水资源承载力预测

本文以各城市为基本单元，构建市域水资源承载力SD模型，再整合市域模型，模拟预测关中地区水资源承载力。模型整合即从水资源、人口、经济三方面入手，将市域模型数据叠加，得到关中地区整体可供水量及用水量。再计算水资源承载指数，识别承载状态。

现状发展模式下，关中地区经济社会结构和水资源开发利用水平按区域规划发展。其中，可供水量以表函数形式，通过综合分析水资源可利用量、供水工程供水能力及用水总量控制指标，经SD模型调算确定。选取2025年、2030年和2035年为典型年分析，结果如表5所示。

由表5可知，现状发展模式下，关中地区整体水资源承载压力逐年变大，从2026年开始将处于超载状态。2025—2035年间，关中地区人口总数预计增加325×10⁴人，常住人口城镇化率提高至0.72，实现工业增加值16255×10⁸元。《西安市"十四五"保障性租赁住房发展规划》预测，2020—2025年关中地区年均增加人口25×10⁴人，与本文预测人口增幅一致。结果表明，由于人口增加、快速城镇化和产业规模扩大，用水总量增幅远大于可供水量，水资源承载状态由临界向超载转化。

引汉济渭工程是缓解关中地区水资源供需矛盾的重大水资源配置工程。根据《陕西省引汉济渭工程项目建议书受水区水资源配置规划》配水总体方案，计划2025年向西安、咸阳和渭南分别供水4.55×10⁸ m³、1.12×10⁸ m³和1.04×10⁸ m³，2035年向西安、咸阳和渭南分别供水5.26×10⁸ m³、1.29×10⁸ m³和1.12×10⁸ m³。绘制引汉济渭工程实施前后，各受水城市水资源承载指数对比图(图5)。

由图5可知，引汉济渭工程实施后，各受水城市水资源承载指数显著减小，但除铜川市外仍大于1。表明跨流域调水措施从"供给侧"，有效缓解了经济社会发展与水资源匮乏之间的矛盾，但相对于快速增长的需求，水资源仍将长期呈"供不应求"的超载态势。因此，还需要从"需求"侧加以调控，探索与经济社会发展相匹配的水资源开发利用模式。

3.3 水资源承载力优化调控

采用正交试验设计法，对2020—2035年引汉济渭工程实施后，水资源仍处于超载状态的城市，即

表5　现状发展模式下关中地区水资源承载力模型预测结果

Tab. 5　Prediction results of water resources carrying capacity model in Guanzhong region under the current development model

指标	年份	西安	铜川	宝鸡	咸阳	渭南	关中
人口/10^4人	2025	1245	77	372	440	517	2650
	2030	1402	75	364	444	520	2805
	2035	1576	74	354	447	524	2975
城镇化率	2025	0.77	0.70	0.65	0.60	0.60	0.66
	2030	0.79	0.72	0.68	0.65	0.63	0.69
	2035	0.80	0.73	0.70	0.70	0.65	0.72
工业增加值/10^8元	2025	3020	206	1934	985	984	7129
	2030	4453	238	3115	1448	1513	10767
	2035	6506	276	5017	2127	2328	16255
可供水量/10^8 m^3	2025	22.63	1.02	8.12	11.16	15.43	58.36
	2030	24.86	1.08	8.23	11.48	15.89	61.53
	2035	27.56	1.15	8.35	11.84	16.60	65.51
用水总量/10^8 m^3	2025	24.52	1.06	8.14	9.20	15.02	57.93
	2030	30.38	1.18	8.81	10.02	16.34	66.73
	2035	38.00	1.34	9.93	11.12	19.05	79.44
水资源承载指数	2025	1.08	1.04	1.00	0.82	0.97	0.99
	2030	1.22	1.09	1.07	0.87	1.03	1.08
	2035	1.38	1.17	1.19	0.94	1.15	1.21

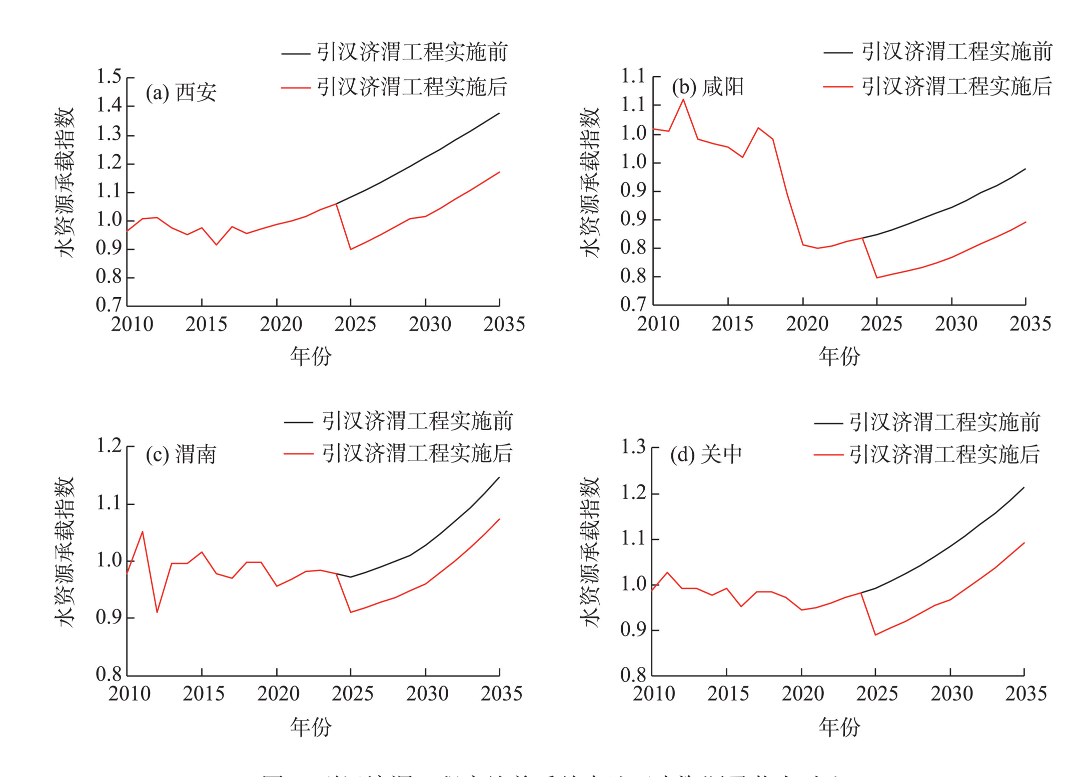


图5　引汉济渭工程实施前后关中地区水资源承载力对比

Fig. 5　Comparison of water resources carrying capacity in Guanzhong region before and after the implementation of the Hanjiang-to-Weihe River Water Transfers Project

西安市、铜川市、宝鸡市和渭南市，进行整体性、阶段性和全面性的调控。整体性调控即对各城市采用相同调控倍比；阶段性调控即在2025年、2030年和2035年分别进行调控；全面性即对各用水部门均加以调控。

（1）调控目标　根据水资源最大开发规模论，调

控目标设定为水资源超载城市的水资源承载力达到临界状态上限值，即承载指数为1。以期对现有经济社会发展、用水结构与水平最小变动条件下，最大程度保证经济社会发展，实现水资源解耦。

（2）调控指标 以关中地区整体用水量变化关键驱动因子为调控指标，对水资源超载城市进行整体调控。由表6可知，强度效应是农业、生活、生态用水量变化的关键驱动因子，规模效应是工业用水量变化的关键驱动因子，结合SD模型，选取单位面积农田灌溉用水量、城镇人均生活用水量、农村人均生活用水量、人均生态用水量和工业增加值增长率5个表函数为调控指标。

（3）调控依据 考虑到不同地区经济社会发展趋势、水资源条件与开发利用能力等存在差异，因此，在关中地区内部选取发展速度与水资源利用水平相对合理城市的指标作为调控依据。其中，工业增加值、农村居民生活用水定额、人均生态用水量调控依据值参考铜川市取值；单位面积农田灌溉用水量参考咸阳市取值；城镇居民生活用水定额参考渭南市取值（表6）。

（4）调控方案 首先，将各指标调控依据值与现状值之差与现状值作比，再进行四等分，将5个调控指标划分为4个水平（表7）；然后根据正交表$L_{16}(4^5)$制定调控方案（表8）。

（5）调控结果 采用市域SD模型，分别模拟16种方案下西安市、铜川市、宝鸡市和渭南市的水资源承载指数。由于各城市水资源承载指数逐年上升，并在2035年达到最大值，故将不同调控方案2035年的水资源承载指数与调控目标作比较，选取绝对差值最小的方案为最优调控方案（表9）。

由表9可知，西安市方案15的ABS(WRCI−1)值最小，为最优调控方案；铜川市方案8的ABS(WRCI−1)值最小，为最优调控方案；宝鸡市和渭南市ABS(WRCI−1)最小值均在方案1中取得，说明方案1为最优调控方案，最优调控方案下调控指标取值如表10所示。

由表10可知，最优调控方案下，西安市单位面积农田灌溉用水量、工业增加值增加率、城镇及城镇生活用水定额、人均生态用水量分别削减8%、54%、12%、18%、7%；铜川市5个调控指标分别削减4%、72%、18%、9%、7%；宝鸡市和渭南市5个调控指标均分别削减2%、18%、6%、5%、7%。各城市工业增加值调控幅度相比其他指标大很多，表明关中地区未来15 a工业规模将呈高位发展态势，调控空间较大，应重点优先调控；而单位面积农田灌溉用水量、城镇及农村生活用水定额、人均生态用水量等用水水平表征指标在节水型社会逐步建设背景下，已经得到较大改善，调节空间相对较小。各城市最优调控方案水资源承载指数如图6所示。

由图6可知，在最优调控方案下，各城市水资源承载状态均由超载状态转变为临界状态。2035年西安市、宝鸡市水资源承载指数调控至1，铜川市、渭南市水资源承载指数调控至0.99，接近或达到水资源承载临界状态上限值，实现以水资源承载力为

表6 关中地区水资源承载力调控指标取值

Tab. 6 Values of water resources carrying capacity control indicators in Guanzhong region

取值	单位面积农田灌溉用水量/($m^3 \cdot hm^{-2}$)	工业增加值增加率/%	城镇居民生活用水定额/($L \cdot 人^{-1} \cdot d^{-1}$)	农村居民生活用水定额/(($L \cdot 人^{-1} \cdot d^{-1}$)	人均生态用水量/($m^3 \cdot 人^{-1}$)
现状值	15.44	9	163.00	78.00	14.82
调控依据值	14.23	3	123.37	63.66	10.83

表7 关中地区水资源承载力调控试验设计

Tab. 7 Control test design of water resources carrying capacity in Guanzhong region

水平	调控倍比				
	单位面积农田灌溉用水量/($m^3 \cdot hm^{-2}$)	工业增加值增加率/%	城镇居民生活用水定额/($L \cdot 人^{-1} \cdot d^{-1}$)	农村居民生活用水定额/(($L \cdot 人^{-1} \cdot d^{-1}$)	人均生态用水量/($m^3 \cdot 人^{-1}$)
1	−0.02	−0.18	−0.06	−0.05	−0.07
2	−0.04	−0.36	−0.12	−0.09	−0.13
3	−0.06	−0.54	−0.18	−0.14	−0.20
4	−0.08	−0.72	−0.24	−0.18	−0.27

表8　关中地区水资源承载力调控方案正交试验设计

Tab. 8　Orthogonal test design of water resources carrying capacity regulation scheme in Guanzhong region

编号	单位面积农田灌溉用水量/(m^3·hm^{-2})	工业增加值增加率/%	城镇居民生活用水定额/(L·人$^{-1}$·d^{-1})	农村居民生活用水定额/((L·人$^{-1}$·d^{-1})	人均生态用水量/(m^3·人$^{-1}$)
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

限制,最大程度保证经济社会发展的调控目标。表明通过约束工业发展规模扩张速度、提高农业用水水平、减缓生活及生态用水增长趋势,能够有效改善关中地区水资源承载状态。

4　讨论与结论

为实现关中地区水资源承载力的动态预测与定量调控,本文建立了基于LMDI分解法、系统动力学及正交试验法的LMDI-SD耦合模型。运用该模型预测关中地区水资源承载要素及承载指数,识别各部门用水量变化关键驱动因子,并以其为调控指标,对超载城市的经济社会用水进行全面调控,最后结合正交试验法筛选最优调控方案,得到如下结果:

(1) 强度效应是2010—2021年关中地区农业用水量减少、生活和生态用水量增加的关键驱动因子,贡献度分别为-7.30×10^8 m^3、1.19×10^8 m^3和3.47×10^8 m^3;规模效应是工业用水量增加的关键驱动因子,贡献度为6.85×10^8 m^3。

(2) 现状发展模式下,由于人口聚集式增加、快速城镇化和产业规模不断扩大,2022—2035年关中地区用水总量预计增加37.13%,增加幅度远大于可供水量(增幅为12.25%),水资源承载压力逐年变大,2035年水资源承载指数为1.21,处于超载状态。

(3) 引汉济渭工程从供给侧有效缓解了经济社会发展与水资源匮乏之间的矛盾,但相对于快速增长的需求,部分城市水资源仍将长期呈“供不应求”的超载态势,还需从需求侧加以调控。

(4) 最优调控方案下,关中地区水资源可调控

表9　水资源超载城市不同方案调控结果(2035年)

Tab. 9　Control results of different schemes for water resources overloaded cities (2035)

调控方案	西安		铜川		宝鸡		渭南	
	WRCI	ABS(WRCI−1)	WRCI	ABS(WRCI−1)	WRCI	ABS(WRCI−1)	WRCI	ABS(WRCI−1)
1	1.10	0.10	1.13	0.13	1.00	0.00	0.99	0.01
2	1.03	0.03	1.09	0.09	0.90	0.10	0.95	0.05
3	0.96	0.04	1.06	0.06	0.83	0.17	0.92	0.08
4	0.90	0.10	1.02	0.02	0.76	0.24	0.90	0.10
5	1.05	0.05	1.11	0.11	0.96	0.04	0.97	0.03
6	1.02	0.02	1.09	0.09	0.90	0.10	0.94	0.06
7	0.97	0.03	1.05	0.05	0.82	0.18	0.92	0.08
8	0.85	0.15	0.99	0.01	0.79	0.21	0.91	0.09
9	1.06	0.06	1.10	0.10	0.95	0.05	0.97	0.03
10	1.02	0.02	1.07	0.07	0.87	0.13	0.94	0.06
11	0.97	0.03	1.07	0.07	0.84	0.16	0.91	0.09
12	0.94	0.06	1.05	0.05	0.79	0.21	0.90	0.10
13	1.04	0.04	1.09	0.09	0.93	0.07	0.96	0.04
14	0.99	0.01	1.07	0.07	0.87	0.13	0.93	0.07
15	1.00	0.00	1.07	0.07	0.82	0.18	0.91	0.09
16	0.96	0.04	1.05	0.05	0.79	0.21	0.89	0.11

表10 关中地区最优调控方案下调控指标变化

Tab. 10 Change of regulation index under optimal regulation scheme in Guanzhong region

城市	年份	单位面积农田灌溉用水量/(m³·hm⁻²)		工业增加值增加率/%		城镇居民生活用水定额/(L·人⁻¹·d⁻¹)		农村居民生活用水定额/((L·人⁻¹·d⁻¹)		人均生态用水量/(m³·人⁻¹)	
		调控前	调控后	调控前	调控后	调控前	调控后	调控前	调控后	调控前	调控后
西安	2025	130	120	8	4	212	186	80	66	32	30
	2030	120	111	8	4	220	193	76	62	38	35
	2035	110	101	8	4	224	196	75	62	43	40
铜川	2025	110	105	3	1	121	104	65	64	5	6
	2030	105	101	3	1	127	109	71	67	6	7
	2035	103	99	3	1	133	115	74	70	7	7
宝鸡	2025	110	107	10	8	161	151	127	121	9	9
	2030	105	103	10	8	177	167	158	150	11	10
	2035	103	101	10	8	190	179	174	166	13	12
渭南	2025	110	107	9	7	109	103	95	91	11	10
	2030	105	103	9	7	102	96	110	105	12	12
	2035	103	101	9	7	96	90	116	111	13	12

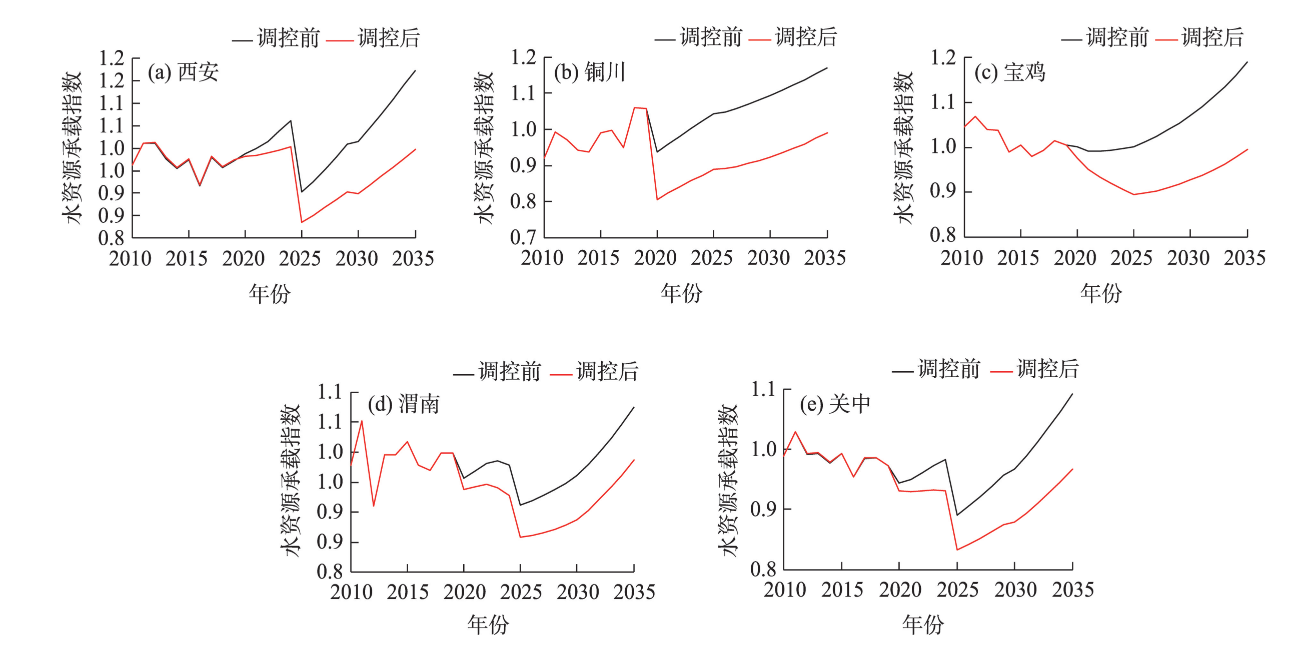


图6 关中地区水资源承载指数调控结果

Fig. 6 Control results of water resources carrying index in Guanzhong region

至临界承载状态，且相较于生活、生态及农业用水水平，工业发展规模调控范围更大，应重点优先调控。

需要指出的是，本文在从供给侧进行水资源承载力调控时，以各部门用水量关键驱动因子为指标，对经济社会各用水部门进行全面调控。虽能满足用水总量在可承载范围内的调控目标，但对各部门内部来说调控全面性不够，但明确了合理规划用水行为的重点方向。各部门用水量受强度效应、规模效应与用水结构效应共同驱动，若单方面调控难以有效改善水资源超载形势，需对其余用水量变化驱动因子也进行调控，最终实现水资源可承载目标，推进经济社会与水资源可持续协调发展。

参考文献(References)：

[1] 王浩, 王建华. 中国水资源与可持续发展[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 352-358, 331. [Wang Hao, Wang Jianhua. Sustainable utilization of China's water resources[J]. Journal of the Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3): 352-358, 331.]

[2] 张臻, 曹春霞, 何波. 国土空间规划体系重构语境下"双评价"研究进展与趋势[J]. 规划师, 2020, 36(5): 5-9. [Zhang Zhen, Cao Chunxia, He Bo. Research progress of "dual evaluations" in the restructuring of national land use and spatial[J]. Planner, 2020, 36

(5): 5-9.]

[3] 党辉, 刘刚, 马清瑞, 等. 陕西省关中地区水资源开发利用现状及节水潜力分析[J]. 陕西水利, 2019(6): 75-77. [Dang Hui, Liu Gang, Ma Qingrui, et al. Analysis of the current situation and water-saving potential of water resources development and utilization in the Guanzhong region of Shaanxi Province[J]. Shaanxi Water Resources, 2019(6): 75-77.]

[4] 吴卫宾, 韩锦辉, 杨天通, 等. 基于SD双要素模型的长春市水资源人口承载力动态模拟[J]. 郑州大学学报(理学版), 2017, 49(4): 126-131. [Wu Weibin, Han Jinhui, Yang Tiantong, et al. Dynamic simulation of water resource population carrying capacity in Changchun City based on SD dual factor model[J]. Journal of Zhengzhou University (Science Edition), 2017, 49(4): 126-131.]

[5] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 262-269. [Xia Jun, Zhu Yizhong. Measurement of water resource security: Research and challenges in water resource carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(3): 262-269.]

[6] 王建华, 姜大川, 肖伟华, 等. 水资源承载力理论基础探析:定义内涵与科学问题[J]. 水利学报, 2017, 48(12): 1399-1409. [Wang Jianhua, Jiang Dachuan, Xiao Weihua, et al. Theoretical basis analysis of water resource carrying capacity: Definition connotation and scientific issues[J]. Journal of Water Resources, 2017, 48(12): 1399-1409.]

[7] 李谨, 董亚军, 傅新, 等. 基于生态足迹法的徒骇河-马颊河流域水资源承载力动态分析与预测[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(5): 524-532. [Li Jin, Dong Yajun, Fu Xin, et al. Dynamic analysis and prediction of water resource carrying capacity in the Tuhai Majia River Basin based on ecological footprint method[J]. Journal of Jinan University (Natural Science Edition), 2022, 36(5): 524-532.]

[8] 张礼兵, 胡亚南, 金菊良, 等. 基于系统动力学的巢湖流域水资源承载力动态预测与调控[J]. 湖泊科学, 2021, 33(1): 242-254. [Zhang Libing, Hu Yanan, Jin Juliang, et al. Dynamic prediction and regulation of water resource carrying capacity in the Chaohu Lake Basin based on system dynamics[J]. Lake Science, 2021, 33(1): 242-254.]

[9] 黄昌硕, 耿雷华, 颜冰, 等. 水资源承载力动态预测与调控——以黄河流域为例[J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 59-67. [Huang Changshuo, Geng Leihua, Yan Bing, et al. Dynamic prediction and regulation of water resource carrying capacity: A case study of the Yellow River Basin[J]. Progress in Water Science, 2021, 32(1): 59-67.]

[10] Winz I, Brierley G, Trowsdale S. The use of system dynamics simulation in water resources management[J]. Water resources management, 2009, 23: 1301-1323.

[11] 杨波, 王文, 秦大军, 等. 海南岛水资源承载力分析及预测[J]. 水文, 2022, 42(3): 78-83. [Yang Bo, Wang Wen, Qin Dajun, et al. Analysis and prediction of water resource carrying capacity in Hainan Island[J]. Hydrology, 2022, 42(3): 78-83.]

[12] 章恒全, 何薇. 基于主成分回归与灰色神经网络模型的水资源承载力需水量预测[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(1): 103-108. [Zhang Hengquan, He Wei. Prediction of water resource carrying capacity and water demand based on principal component regression and grey neural network model[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(1): 103-108.]

[13] Winz I, Brierley G, Trowsdale S. The use of system dynamics simulation in water resources management[J]. Water Resources Management, 2009, 23: 1301-1323.

[14] Mirchi A, Madani K, Watkins D, et al. Synthesis of system dynamics tools for holistic conceptualization of water resources problems [J]. Water Resources Management, 2012, 26: 2421-2442.

[15] 张雪花, 郭怀成, 张宝安. 系统动力学-多目标规划整合模型在秦皇岛市水资源规划中的应用[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 351-357. [Zhang Xuehua, Guo Huaicheng, Zhang Bao'an. Application of system dynamics multi objective programming integration model in water resources planning of Qinhuangdao City[J]. Progress in Water Science, 2002, 13(3): 351-357.]

[16] 康艳, 闫亚廷, 杨斌. 基于LMDI-SD耦合模型的绿色发展灌区水资源承载力模拟[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 150-160. [Kang Yan, Yan Yating, Yang Bin. Simulation of water resource carrying capacity in green development irrigation areas based on LMDI-SD coupling model[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2020, 36(19): 150-160.]

[17] 李琪. 关中平原浅层地下水资源现状及管理保护对策[J]. 地下水, 2012, 34(5): 62-63. [Li Qi. Current situation and management protection measures of shallow groundwater resources in the Guanzhong plain[J]. Groundwater, 2012, 34(5): 62-63.]

[18] 刘俊民, 郭瑞. 关中平原降水特征分析[J]. 人民黄河, 2008, 30(5): 22-24. [Liu Junmin, Guo Rui. Analysis of precipitation characteristics in the Guanzhong plain[J]. People's Yellow River, 2008, 30(5): 22-24.]

[19] 屈小娥. 陕西省水资源承载力综合评价研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(2): 91-97. [Qu Xiao'e. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Shaanxi Province[J]. Resources and Environment in Arid Areas, 2017, 31(2): 91-97.]

[20] Kaya Y. "Impact of Carbon Dioxide Emission Control on Gnp Growth: Interpretation of Proposed Scenarios" Ppcc Response Strategies Working Group Memorandum 1989[R]. IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, 1990.

[21] 谢娟, 粟晓玲. 基于LMDI的灌溉需水量变化影响因素分解[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 123-131. [Xie Juan, Su Xiaoling. Decomposition of factors influencing changes in irrigation water demand based on LMDI[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2017, 33(7): 123-131.]

[22] 朱文礼, 张礼兵, 伍露露, 等. 基于系统模拟的县域水资源承载力动态预测及调控研究——以庐江县为例[J]. 中国农村水利水电, 2020(2): 16-22. [Zhu Wenli, Zhang Libing, Wu Lulu, et al. Dynamic prediction and regulation of county water resource carrying capacity based on system simulation: A case study of Lujiang County[J]. China Rural Water Resources and Hydropower, 2020(2): 16-22.]

[23] 黄天意, 周晋军, 李雅君, 等. 六种预测模型在北京市城市生态

环境用水短期预测中的比较[J]. 水利水电技术, 2022, 53(3): 119−133. [Huang Tianyi, Zhou Jinjun, Li Yajun, et al. Comparison of six prediction models in short-term prediction of urban ecological environment water use in Beijing[J]. Water Resources and Hydropower Technology, 2022, 53(3): 119−133.]

[24] 卢方园, 贾德彬, 高瑞忠, 等. 库布齐沙漠社会经济系统动态仿真及其应用[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1102−1111. [Lu Fangyuan, Jia Debin, Gao Ruizhong, et al. Dynamic simulation and application of the social and economic system in the Kubuqi desert [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1102−1111.]

[25] 王奕淇, 李国平, 延步青. 基于SD与AHP模型的流域水资源承载力仿真研究[J]. 系统工程, 2022, 40(3): 24−32. [Wang Yiqi, Li Guoping, Yan Buqing. Simulation study on basin water resource carrying capacity based on SD and AHP models[J]. Systems Engineering, 2022, 40(3): 24−32.]

[26] 程吉林, 郭元裕. 大系统数学规划试验选优方法及其应用[J]. 中国科学: E 辑, 1998, 28(3): 254−258. [Cheng Jilin, Guo Yuanyu. Optimization methods and applications for large system mathematical programming experiments[J]. Chinese Science: Series E, 1998, 28(3): 254−258.]

Dynamic prediction and regulation of the water resource carrying capacity in the Guanzhong region based on the LMDI-SD coupling model

JIA Qiong[1], SONG Xiaoyu[1], SONG Shuhong[2], LIU Xiaodi[1], QIN Lin[1], LIU Hui[1]

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi’an University of Technology, Xi’an 710048, Shaanxi, China; 2. Hydrology and Water Resources Investigation Center of Shaanxi Province, Xi’an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: To realize the dynamic prediction and quantitative regulation of water resource carrying capacity, an LMDI-SD coupling model based on the LMDI decomposition method, system dynamics (SD), and orthogonal test method was established. The coupling model uses the LMDI decomposition method to identify the driving factors of water consumption change, establishes the SD model to predict the water resource carrying capacity, takes the key driving factors of water consumption change of each department as the regulation index, comprehensively regulates the economic and social water use, and selects the optimal regulation scheme combined with the orthogonal test method. Applied to the dynamic prediction and regulation of water resource carrying capacity in the Guanzhong region between 2020 and 2035, the results show that the following: (1) the intensity effect is the key driving factor for the decrease in agricultural water consumption and the increase in domestic and ecological water consumption in the Guanzhong region between 2010 and 2019, whereas the scale effect is the key driving factor for the increase in industrial water consumption; (2) under the current development mode, the water resource bearing pressure of the whole Guanzhong region and cities will increase yearly from 2020 to 2035, and will be in an overloaded state by 2035 as the increase in total water consumption is far greater than the available water supply; (3) the Han to Wei River Diversion Project effectively alleviated the contradiction between supply and demand of water resources in the Guanzhong area from the supply side. However, compared with the rapidly growing demand, water resources in some cities remain limited; therefore, they should be regulated from the demand side; (4) by restricting the expansion speed of industrial development, improving the level of agricultural water use, and slowing down the growth trend of domestic and ecological water use, the water resources in the Guanzhong region can be bearable from 2020 to 2035. The LMDI-SD coupling model constructed in this study has good practical application value for regional water resource planning and management within the framework of sustainable development.

Keywords: water resources carrying capacity; dynamic prediction; quantitative regulation; system dynamics; Guanzhong region